پروژه تحقیق کارشناسی

دانشکده مهندسی مکانیک و مواد

موضوع:

گداخت هسته ای بر مبنای محصوریت مغناطیس

اساتید مربوطه:

دکتر علی سپهر و دکتر سعید کهربائی

نام دانشجو:

علیرضا محمدزاده

دانشجوی مهندسی انرژی

تیرماه ۱۳۹۸

بسم الله الرحمن الرحيم

وزارت علوم تحقیقات و فناوری

دانشگاه صنعتی سجاد

غیردولتی - غیرانتفاعی

پروژه تحقیق دروس

سیاست گذاری انرژی، تبدیل انرژی

موضوع:

گداخت هسته ای بر مبنای محصوریت مغناطیس

اساتید مربوطه:

دکتر علی سپهر و دکتر سعید کهربائی

نام دانشجو:

علیرضا محمدزاده

دانشجوی مهندسی انرژی

تیرماه ۱۳۹۸

سپاسگزاری

حضرت علی(ع) فرمودند:
« مَن عَلَّمَنی حَرفاً فَقَد صَیَرنی عَبداً »

از جناب دکتر علی سپهر، بابت راهنمایی های صبورانه اینجانب در خصوص درک مباحث مرتبط با انرژی و ایجاد دید گسترده نسبت بدان و همچنین جناب دکتر کهربائی که موجب تلاش فراوان اینجانب بودند، نهایت تقدیر و تشکر را دارم .

تقدیم به:

تمامی رهپویان راه علم و معرفت

چکیده

در جهانی که همواره پیشرفت تکنولوژی های گوناگون در زمینه های مختلفی همچون تامین سطح استانداردهای زندگی فردی-اجتماعی، رسانه های ارتباطی، سیاسی و حتی نظامی کشورها در حال گسترش است و از طرفی مصرف گرایی جوامع انسانی در زمینه انرژی به چشم میخورد، تقاضا جزء جدایی ناپذیر مفهوم زندگی بر روی زمین تعریف می شود که انسان در طی سالیان گذشته برای تأمین این تقاضای رو به افزایش بشر دست به استفاده از انواع منابع انرژی زده است که هرکدامشان نکات مثبت و منفی خاص خودشان را داشته اند اما از اثرات غیرقابل چشم پوشی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم توسط انتشار گازهای ناشی از سوختن سوخت های فسیلی نمیتوان به راحتی گذشت. بگونه ای دسترسی به انرژی مداوم و بدون وقفه نوعی امنیت انرژی و منافعی در ارتباط با پایداری و ثبات را برای تأمین کننده انرژی به همراه خواهد داشت. از اینرو فیوژن منبعی قابل اطمینان به جهت تامین این میزان تقاضای انرژی و تکیه بر آن به عنوان بخشی از سبد انرژی یک کشور در سال های آینده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی

فیوژن ، مصرف انرژی ، امنیت انرژی، ثبات، پایداری

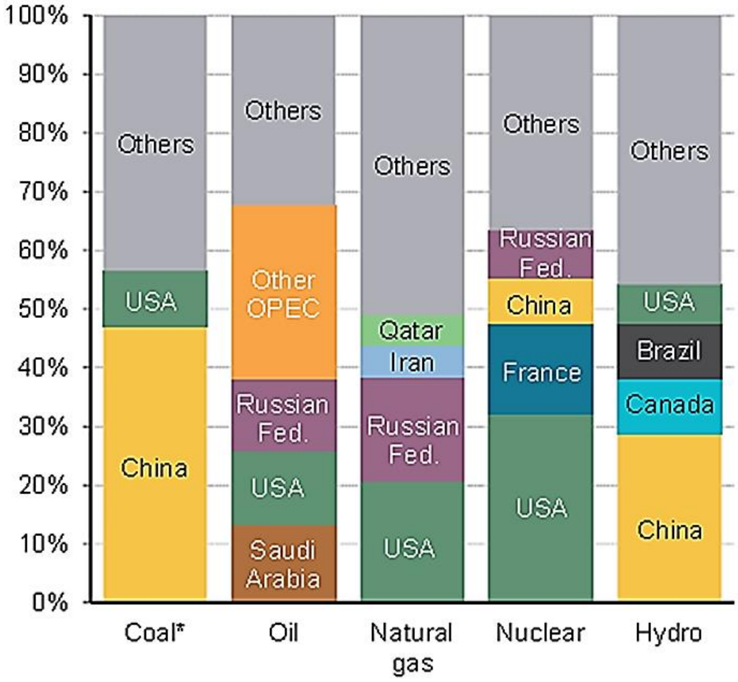
فهرست مطالب

فصل اول (مقدمه)

۱-۱- مسئله تامین انرژی

۱-۱-۱ مصرف ، عرضه و تقاضای انرژی

با گسترده بودن منابع انرژی از لحاظ ژئوپلتیکی در سطح جهان و مشکلات و مسائل سیاسی در دنیا، تولید انرژی به طور مساوی در کشورها توزیع نمی شود، بطوری که برای هر سوخت، کم‌تر از ۵ کشور به طور کلی، بیش از نیمی از تولید جهانی انرژی را در بر می‌گیرند (شکل ۱-۱-۱-۱). همانطور که در شکل مشاهده می شود، چین آنچنان فا صله ای تا تولید نیمی از زغال‌سنگ جهان در سال ۲۰۱۶ و ۲۹٪ برق آبی را نداشته است، ایالات متحده و فرانسه مجموعا ۵۰٪ از کل انرژی هسته‌ای را تولید کردند و عربستان سعودی، فدراسیون روسیه و ایالات متحده کمی کم‌تر از ۴۰٪ نفت خام جهان را به خود اختصاص داده اند .[3]



شکل ۱-۱-۱-۱- بزرگترین تولید کنندگان بر حسب سوخت در سال ۲۰۱۶. [3]

کشورهای غیر عضو سازمان همکاری ها سهم به طور مداوم در حال رشدی از مصرف انرژی جهان را تشکیل می دهند. در سال ۲۰۱۶، چین به میزان ۲۱,۵ درصد از عرضه کل انرژی اولیه[1] جهانی را به خود اختصاص داده در حالیکه ایالات متحده به میزان ۱۵,۷ در صد بوده ا ست (جدول ۱-۱-۱-۱). هند و فدرا سیون رو سیه به ترتیب رتبه سوم و چهارم را ک سب کردند و ژاپن، دومین ک شور م صرف کننده در ک شورهای ع ضو سازمان همکاری ها [2] در مقام پنجم قرار گرفت. در کنار یکدیگر، این پنج کشور بیش از نیمی از عرضه کل انرژی اولیه جهانی را در سال ۲۰۱۶ به دست گرفتند.[3]

همانطور که در جدول ۱-۱-۱-۱ مشاهده میشود، تقاضای جهانی انرژی بیشتر در سال ۲۰۱۶ در مقایسه با سال ۱۹۷۱ متمرکز بود؛ زیرا ده کشور برتر، ۶۲ درصد از تقاضای جهانی انرژی اولیه (بر حسب معادل میلیون تن نفت) را در مقایسه با ۵۶ درصد در سال ۱۹۷۱ به خود اختصاص داده اند.[3]

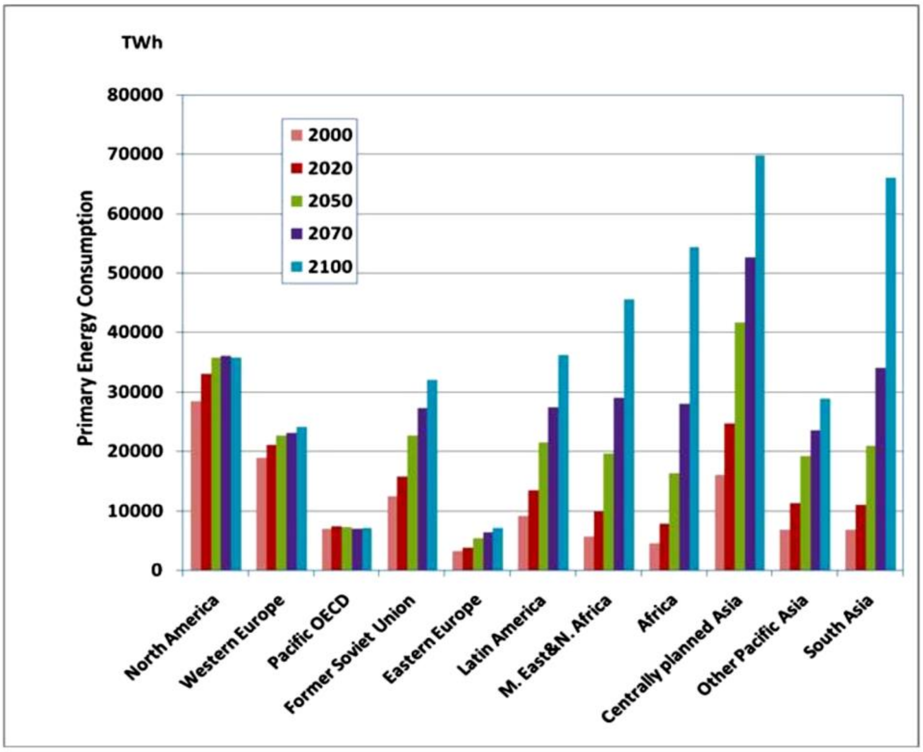
Country	TPES (Mtoe)	Share in world TPES	
		2016	1971
People's Rep. of China	2 958	22%	7%
United States	2 167	16%	29%
India	862	6%	3%
Russian Federation	732	5%	N/A
Japan	426	3%	5%
Germany	310	2%	6%
Brazil	285	2%	1%
Korea	282	2%	0.3%
Canada	280	2%	3%
Islamic Republic of Iran	248	2%	3%
Rest of the world	5 211	38%	44%
World	**13 761**	**100%**	**100%**

جدول ۱-۱-۱-۱- ده کشور پیشرو در عرضه انرژی اولیه جهانی در دو سال

[1] TPES (total primary energy supply)

[2] OECD

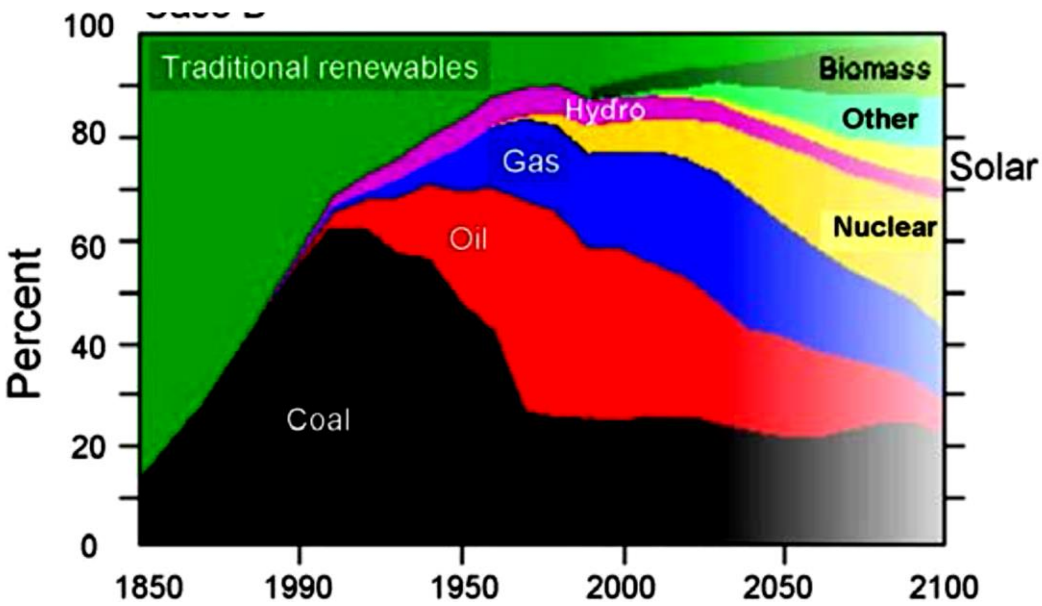
مصــرف گذشــته و پیش‌بینی‌های تحلیل کمیســون جهانی انرژی[1] از کل مصــرف انرژی اولیه در مناطق مختلف جهان در شکل ۲-۱-۱-۱ نشان داده شده است . از این رو ، همانطور که در بسیاری از مطالعات اخیر به خوبی مستندسازی شده‌است ، در حالی که کشورهای عضو سازمان همکاری ها که به فن‌آوری های پیشرفته تجهیز شده اند در اواخر این قرن رشد ثابتی از مصــرف انرژی اولیه را دنبال میکنند ، کشــورهای در حال توســعه در جنوب و آســیای مرکزی مانند هند و چین ، یک رشــد چ شمگیر (تا ده برابر) در م صرف انرژی اولیه را ن شان می‌دهند . در حقیقت ، انتظار می‌رود که تا پایان قرن حا ضر م صرف انرژی نهایی در کشورهای در حال توسعه به بیش از سه برابر میزان مصرف در کشورهای عضو سازمان همکاری ها و کشورهای اتحاد جماهیر شوروی سابق با شد .[2] به بیان دیگر سرمایه گذاری در بخش تحقیق و تو سعه ی تجهیزات تولید و م صرف انرژی ، افزایش راندمان آنها و رعایت اســـتاندارد های عملیاتی انرژی برای اماکن و دســـتگاه ها از جمله فاکتور های مهم در زمینه تعیین مصرف انرژی برای یک کشور ا ست که خود مو ضوع تقا ضای انرژی از سوی م صرف کننده و تامین آن از جانب دولت ها را بیان میکند.



شکل ۱-۱-۱-۲- مصرف انرژی اولیه در جهان در طی سالیان گذشته و پیش بینی آینده

[1] WEC

به رغم تفاوت‌ها در پیش‌بینی‌های مربوط به سناریوی انرژی جهانی، یک عامل رایج به طور کلی برای همه آن‌ها، بیان یک انتقال تدریجی از منابع سوخت فسیلی تا پایان قرن بیست و یکم به سمت سایر منابع انرژی میباشد. شکل ۱-۱-۱-۳ کاربرد واقعی منابع انرژی مختلف و پیش‌بینی‌ها را تا پایان این قرن با مدل سناریوی سازمان انرژی جهانی[۱]نشان می‌دهد . نکته مهم در این طرح ، وابستگی فزاینده به منابع سوخت غیر فسیلی ، برای مثال انرژی هسته‌ای و تجدید پذیر ، در نیمه دوم این قرن ، همزمان با کاهش تدریجی وابستگی به نفت و گاز است . مهم است توجه کنیم که در این مدل ، سهم زغال‌سنگ در قیاس با ارزش امروز بیشتر یا کم‌تر ثابت باقی می‌ماند .[2]

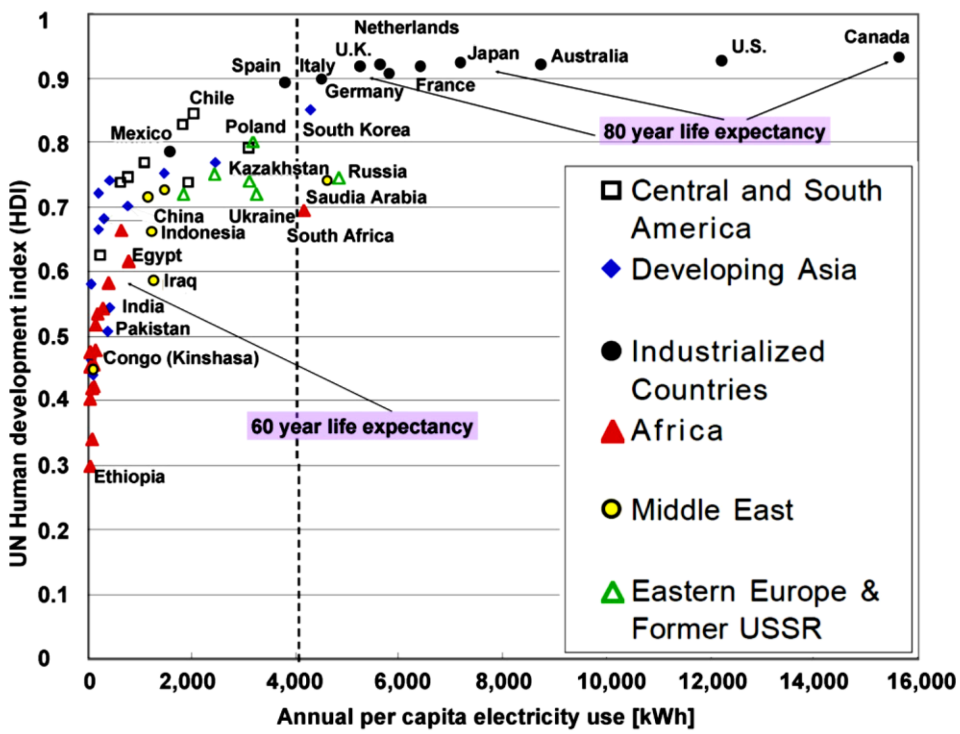


شکل ۱-۱-۱-۳-میزان درصد سوخت های به کار گرفته شده در سناریو سازمان جهانی انرژی

[۱] IEA

۱-۱-۲- جمعیت و انرژی

انســـانهای مدرن نیاز به انرژی و میزان بســـیاری از آن برای ایجاد یک زندگی راحت را دارند. در واقع، کیفیت زندگی در مناطق مختلف جهان می تواند به طور مستقیم با استفاده از انرژی سرانه مرتبط باشد. در این راستا، شاخص توسعه انسانی [۱] کشورهای مختلف بر اساس گزارش های مختلف برنامه توسعه سازمان ملل متحد[۲]همانطور که در شکل ۱-۱-۲-۱ مشاهده میگردد، به صورت یک پارامتر اندازه گیری کیفیت زندگی در یک بخش معین جهان، به طور مستقیم با مقدار مصرف برق در ازای هر فرد تعیین شده است. بیشتر کشورهای در حال توسعه (حدود ۵ میلیارد نفر) به سمت بالای منحنی شاخص توسعه انســانی در مقابل مصـــرف برق هر فرد، خیزش می کنند که از مقادیر پایین مطلق امروز تا میانگین کل جهان و در نهایت به سوی متوسط کشورهای توسعه یافته حرکت میکنند. این یک گرسنگی انرژی عظیم برای کل جهان است. تخمین زده شده است که تا سال ۲۰۵۰، تقاضای جهانی انرژی با یک عامل ضریب ۳ در یک سناریو با رشد بالا افزایش خواهد یافت. تقاضا در سال های فراتر از ۲۰۵۰، حتی بالاتر خواهد رفت.[2]



شکل۱-۱-۲-۱- شاخص توسعه انسانی سازمان ملل متحد بر حسب میزان انرژی الکتریکی هر کشور به ازای هر فرد

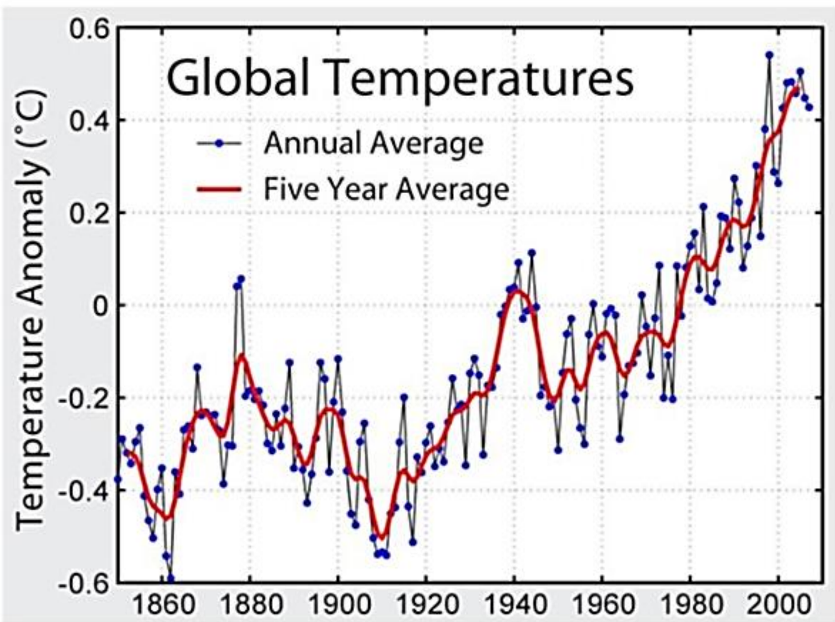
---

۱ HDI

۲ UNDP

۱-۱-۳ مصرف انرژی و محیط زیست

با اطلاع از مطالب بیان شده در قسمت های قبل، اگر زغال سنگ موجود در جهان برای کمی بیش از ۱۵۰ سال باقی باشد، چشم انداز کشورهایی مانند هند و چین که مجبور به تکیه بر زغال سنگ برای تقاضای انرژی خود هستند برای محیط زیست کل زمین فاجعه بار خواهد بود، همانطور که از بحث های اخیر دولت ها و سازمان ها در مورد افزایش گرمایش جهانی آغاز می شود، در حال حا ضر جهان در حال افزایش دمای پایدار ا ست که شکل ۱-۱-۳-۱ میزان افزایش درجه حرارت بر حسب سال را نشان میدهد، و اثرات آن در حال حاضر در تغییرات اقلیمی جهانی شامل تغییرات الگوهای جریان در جریانات اقیانوسی، و نیز ذوب شدن یخ ها در مناطق قطبی و هیمالیا میباشند. با این حال، برخی معتقدند که در پیش بینی های بلند مدت، آینده نگری آب و هوایی ممکن است نامطمئن باشد؛ فرض بر این است که عدم قطعیت لزوما منجر به وضعیت مطلوب می شود.[2]



شکل ۱-۱-۳-۱- میزان رشد درجه حرارت جهانی برحسب سال بطور میانگین سالانه و پنج ساله

۱-۱-۳-۱- خسارت محیطی به عنوان تابعی از نرخ تغییر در میزان کربن اتمسفر

اکثر مطالعات آنالیزی نشان می‌دهند که آسیب ناشی از گرم شدن جهانی هوای کره زمین، به سطح دمایی مرتبط است. با این حال، می توان استدلال کرد که آسیب به میزان تغییر دما بستگی دارد و یک مقدار مطلق به خود برای هر میزان از تغییر درجه حرارت را اختصاص میدهد. همچنین اکولوژی می‌تواند با یک تغییر دمایی خاص سازگار شود. با این حال، اگر نرخ تغییر اقلیمی بالا باشد، ممکن است دوره آسیب طولانی شود تا این که گونه‌های اصلی توسط نمونه‌های مقاوم جایگزین شوند. در حالی که برای مثال ، کشاورزی ممکن است با آب و هوا کاملا تغییر پذیر باشد، اکو سیستم‌های مدیریت نشده کم‌تر تغییری را با دما دارند. مثال دیگر ، انسان است که قادر به تطبیق با تغییرات آب و هوایی است و می‌تواند تحت هر شرایط آب و هوایی که در زمین موجود است زندگی کند . با این حال ، تغییرات سریع در آب و هوا بر رفتار انسانی، میزان شیوع بیماری و مرگ و میر تاثیر می‌گذارد .[9]

علاوه بر این، استفاده گسترده از سوخت های فسیلی برای تولید انرژی در قرن گذشته به طور جدی محیط زیست را تحت تاثیر قرار داده است. گازهای گلخانه ای، گرم شدن قابل توجهی از سیاره و پیامدهای ناشی از آن را ایجاد می کند. استفاده گسترده از ذغال سنگ همچنین باعث پدیده هایی در مراکز عمده شهری شده است. با این حال اگر مصرف سوخت های فسیلی را تا سه برابر افزایش دهیم، عواقب آن برای محیط زیست جهانی احتمالا ناخوشایند خواهد بود. با توجه به بحث فوق، بعید است که استفاده از سوخت های فسیلی برای تولید انرژی، علیرغم نیازها، رشد نامحدود داشته باشد.[2]

از سوی دیگر ، انرژی هسته‌ای مبتنی بر شکافت هسته‌ای ، اگرچه نقش حمایتی مهمی (یا حتی نقش غالب در کشورهایی مانند فرانسه) ایفا می‌کند ، ایمنی ، دفع ضایعات رادیو اکتیو و مسائل تکثیر هسته‌ای را در بر دارد . به طور مشابه ، نیروگاه‌های برق براساس منابع تجدیدپذیر مانند باد یا خورشید ، در حالی که در حال حاضر با سرعت قابل‌توجهی در حال رشد هستند ، به دلیل تراکم انرژی پایین و عدم تناسب با مجتمع‌های صنعتی شهری ، به ایفای نقش حمایتی خود ادامه خواهند داد .[2]

بنابراین , اگرچه ممکن است بتوانیم به نحوی نیازهای انرژی خود را در کوتاه‌مدت برآورده کنیم اما راه‌حل برای نیازهای طولانی‌مدت انرژی چیست و چه کسی می‌تواند این چالش را بپذیرد؟ خوشبختانه در اواخر این قرن, شناخت رو به رشدی در میان دولت‌ها در سراسر جهان از پیامدهای مصیبت‌بار گرم شدن کره زمین و نیاز به حمایت از توسعه تکنولوژی‌های جدید

انرژی بوجود آمده ا ست. بـ سیاری از دولت‌ها عدم افزایش دمای بیش از ۲ c ° را هدف قرار داده‌اند . این امر به کاهش انتـشار دی‌اکسید کربن در طول نیم‌قرن آینده منجر خواهد شد. شایان‌ذکر است که با افزایش تقاضای جهانی از یک سو و نگرانی‌های زیســـت‌محیطی و اجتماعی از ســـوی دیگر, نیازمندی‌های کاملاً متضـــاد در زنجیره انرژی بوجود خواهد آمد. علاوه بر این, سیـ ستم‌های انرژی که به تو سعه پایدار کل نـ سل بـ شر منجر می شوند, باید نیازهای نـ سل حا ضر را بدون به خطر انداختن نسل‌های آینده مورد توجه قرار دهند .[2]

۱-۱-۴- پارامتر های منابع انرژی جدید

منابع انرژی جدید باید به موقع توسعه یابند و موارد زیر را در نظر بگیرند :

- باید براساس فرآیندهای تبدیل انرژی کارآمد(راندمان بالا)، پاک و با پذیرش گسترده عمومی باشند.
- باید به توســـعه پایدار کل جهان هدایت شـــوند؛ بنابراین باید براســـاس منابع واقعا پایان‌ناپذیر تعیین و در ســـطح جهانی موجود باشند بدون اینکه به منابع مناطق دارای بی‌ثباتی سیاسی وابسته باشند .
- باید به اندازه کافی دارای چگالی انرژی بالا باشـــند؛ قادر به راه اندازی صـــنایع با مقیاس بزرگ ، بدون نیاز به مقیاس بسیار زیاد تاسیسات گسترده باشند .[2]

۱-۱-۵ انرژی هسته ای

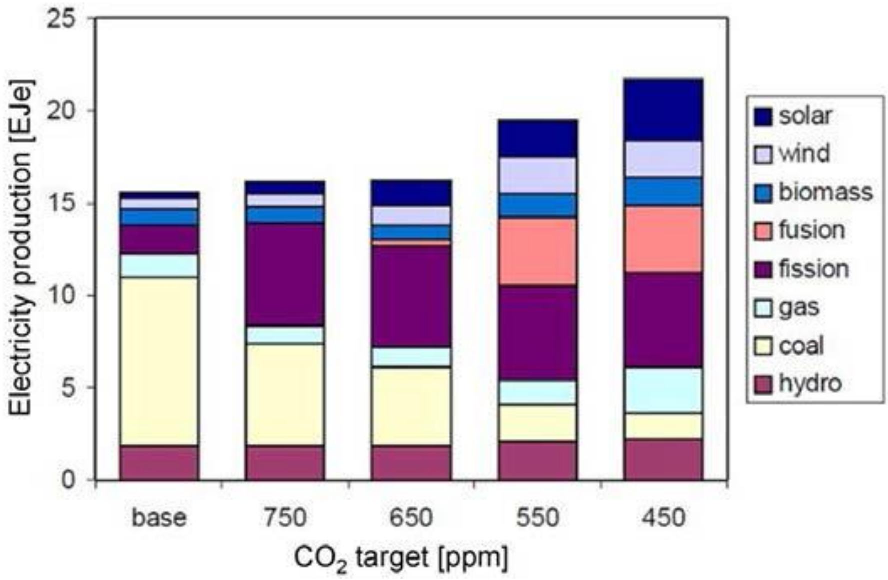
با این حال, همانطور که به انرژی هسته‌ای به عنوان یک منبع انرژی اولیه مهم نگاه می‌کنیم, این مهم است که عدم قطعیت‌ها در پذیرش بسیار گسترده بهره‌برداری از قدرت شکافت را در نظر بگیریم که تمام تخم‌های هسته‌ای[1] خود را در یک سبد قرار ندهیم. ما همچنین باید به تمام فن‌آوری‌های پیشرفته انرژی هسته‌ای نگاه کنیم. فیوژن یکی از چنین مواردی است . بنابراین اگر یکی از اهداف، محدود کردن میزان انتشار $CO2$ به هر میلیون قسمت[2] باشد, در حالی که محدودیت افزایش

---

[1] همه ی انتخاب های خود را به یک گزینه محدود نکنیم.

[2] ppm

می‌یابد استفاده از ذغال‌سنگ کاهش و سهم منابع دیگر افزایش میابد و شکافت و فیوژن نقش قالبی را به همراه یکدیگر بازی می‌کند (شکل ۱-۱-۵-۱) .[2].



شکل ۱-۱-۵-۱- میزان انتشارات کربن و تولید انرژی الکتریکی توسط منابع انرژی به سال ۲۱۰۰

از این رو به جهت افزایش خطرات و نگرانی های تدریجی در مورد اثرات مخرب انتشار گازهای گلخانه ای نا شی از کاربرد فرآیند انرژی های فسیلی، واضح است که از کاربرد انرژی هسته ای به عنوان یکی از رهیافت های زیست محیطی برای مقابله با افزایش دمای کره زمین و کاهش آلودگی محیط زیست یاد می شود. لذا در صورت رفع موانع و مسایل سیاسی و نیز دارا بودن تکنولوژی مناسب و رعایت کامل اصول ایمنی مربوط به گسترش انرژی هسته ای در جهان به ویژه در کشورهای درحال توسعه و جهان سوم، این انرژی در دهه های آینده نقش مهمی در کاهش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه ای ایفا خواهد نمود. در حالیکه آلودگی های ناشی از نیروگاه های فسیلی سبب وقوع حوادث و مشکلات بسیار زیاد بر محیط زیست و انسان ها می شود، سوخت هسته ای گازهای سمی و مضر تولید نمی کند و مشکل زباله های اتمی نیز تا حد مناسبی رفع ولیکن به طور کامل برطرف نشده است. از سوی دیگر به نظر می رسد که بیشترین اعتراضات و مخالفت ها در زمینه استفاده از انرژی اتمی به خاطر عدم رعایت کامل اصـــول ایمنی و وقوع حوادث و انفجارات در برخی از نیروگاه های هســـته ای نظیر حادثه اخیر در نیروگاه چرنوبیل می باشد که این امر با توجه به اثرگذاری شدید، پایداری بسیار بالا و پرتوزایی قوی مواد هسته ای انتشاریافته در اثر یک فاجعه هسته ای می بایست با حساسیت بالا و نیز اتخاذ سیاست های و تصمیمات ملی مناسب صورت پذیرد. این

قضیه تا حدی دارای اهمیت می باشد که کشور آلمان به عنوان یکی از پیشروان کاربرد انرژی های تجدیدپذیر رویکرد خود را جهت تعطیلی کامل نیروگاه های هسته ای تا سال 2020 اعلام نموده و با کاربرد منابع تجدیدپذیر همچون نیروگاه بادی با نصب توربین بادی در خطوط ساحلی و ایجاد مزرعه بادی و نیز نیروگاه خورشیدی سهم بسیار زیادی از نیاز انرژی برق خود را تامین می نماید. از سوی دیگر امروزه با توجه به مفاهیم امنیت ملی، امنیت همه کشورهای جهان در گرو دسترسی مطمئن به انرژی است و بی جهت نیست که انرژی یک بخش استراتژیک و زیربنایی مهم در اقتصاد هر کشور به حساب می آید. در فرآیند توسعه ی اقتصادی و اجتماعی کشورها در سه دهه گذشته دو مسئله عمده در بخش انرژی در رابطه با بهره برداری از منابع انرژی مطرح بوده است. از یک طرف رشد و توسعه اقتصادی و بهبود سطح زندگی مردم ایجاب کرده است که انرژی لازم برای تداوم فعالیت های تولیدی و گسترش آن ها تامین شود. از طرف دیگر وابستگی اقتصادی کشور به درآمدهای ارزی حاصل از فروش نفت و وابستگی انکارناپذیر بخش های اقتصادی و اجتماعی به بخش نفت و پایان پذیری این منابع در دهه های آینده چگونگی بهره برداری از منابع انرژی را زیر سوال برده است. طرفداران انرژی هسته ای در دنیا اعتقاد دارند که انرژی هسته ای بر پایه حقایقی نظیر تقاضای فزاینده انرژی و تهی شدن منابع فسیلی در دهه های آینده، انتشار در حد صفر آلاینده های زیست محیطی انرژی اتمی و پایین بودن هزینه اجتماعی نسبت به سایر گزینه های سوخت قرار داشته و جهان فردا برای تامین بخش قابل توجه ای از مصرف انرژی خود چاره ای جز استفاده از انرژی هسته ای نخواهد داشت.[2]

ضرورت استفاده از انرژی هسته ای هم از نظر راهبردی و هم از جنبه اقتصادی در بسیاری از کشورهای جهان در مرحله توسعه قرار دارد. این ضرورت هنگامی بیشتر احساس می شود که با راه اندازی یک نیروگاه هسته ای بزرگ می توان از مصرف روزانه ۵۰۰۰۰ بشکه نفت جلوگیری نمود. با احتساب قیمت نفت مشخص می شود که هزینه های سرمایه گذاری برای یک نیروگاه هسته ای در عرض چند سال جبران خواهد گردید. همچنین این روش با توجه به اینکه ذخایر نفت جهانی رو به کاهش است می تواند به عنوان یک روش مطمئن برای آینده در نظر گرفته شود.[11]

فصل دوم: فیوژن چیست

۲-۱ منشاء انرژی فیوژن

هسته ی اتم های سبک مانند هیدروژن برخورد می کنند و در نتیجه ی آن برای تولید هسته ی اتم های سنگین تر مانند هلیوم، انتشار مقادیر زیادی از انرژی را باعث میشوند. این فرایند تحت عنوان فیوژن[۱]بیان میشود. از آنجا که انرژی تولید شده از واکنش هسته مشتق شده است، فیوژن شکلی از انرژی هسته ای است. همچنین ممکن است این شکل از انرژی هسته ای در مقابل شکافت در نظر گرفته شود.

فیوژن فرآیندی است که تولید انرژی در ستارگان مانند خورشید ما را هدایت می کند و آنان را قدرت میبخشد و اینگونه است که ستارگان در کیهان به سوختن و ادامه بقای خود برای تولید انرژی تلاش میکنند.[7][1]



شکل ۲-۱-۱- منشاء قدرت بخشی فیوژن در ستارگان

۲-۱-۱ فیوژن در خورشید

گرانش خورشید که تقریبا ۲۸ برابر زمین است، هیدروژن را در فضای اتمسفر خود به دام می اندازد و این هیدروژن باعث آغاز واکنش فیوژن در خور شید می شود. در درجه حرارت ۱۵ میلیون درجه سانتیگراد در هسته خور شید، گاز هیدروژن به پلاسما که حالت چهارم ماده است تبدیل میشود. در یک پلاسما، الکترونهای باقیمانده منفی در اتمها به طور کامل از هسته (یا یونهای اتمی) مثبت باقیمانده جدا میشوند. نیروی گرانشی خور شید، هسته هیدروژن با بار مثبت را محدود می کند و با

[۱] گداخت

درجه حرارت بالایی که کار می کند باعث می شود که هسته ها به سرعت حرکت کنند که در نتیجه ی آن با سرعت بالا به یکدیگر برخورد می کنند که بر نیروی دافعه ی الکترواستاتیک طبیعی که بین بارهای مثبت وجود دارد غلبه میکند[1] و فیوز[2] برای تشکیل هلیم سنگین تر بوقوع میپیوندد. به طور کلی در فرآیند واکنش فیوژن در خورشید، چهار پروتون هیدروژن به یک هسته هلیوم-۴ تبدیل می شوند. در طی انجام واکنش بین هسته ها انرژی آزاد شده، زیرا هسته هلیوم تشکیل شده در نتیجه ی واکنش دارای جرمی کمتر از چهار پروتون اصلی در شروع واکنش است که این واقعیت با بیان جرم و انرژی اینشتین در ارتباط است.(رابطه ۲-۱-۱-۱)

رابطه ۲-۱-۱-۱ :

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

که در این رابطه :

ΔE: میزان انرژی بدست آمده از واکنش

Δm: اختلاف جرمی بین واکنش دهنده ها و محصولات واکنش

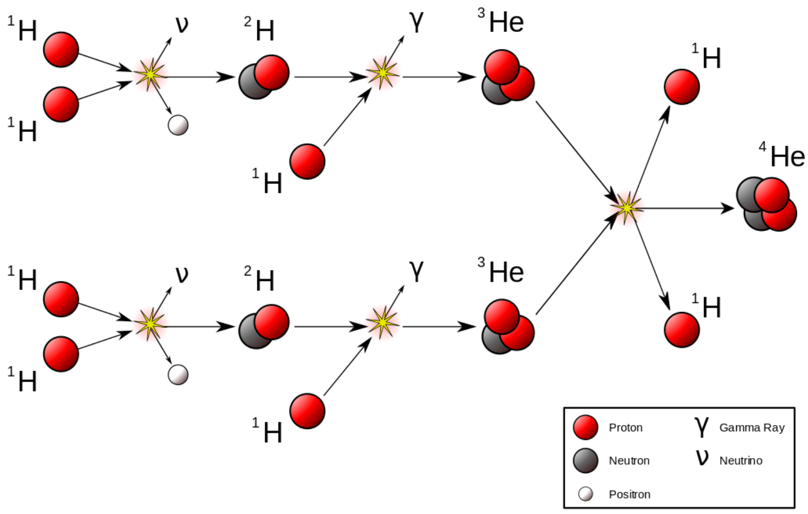
و c : سرعت نور میباشند.

مقدار کل انرژی آزاد شده برای هر تبدیل چهار هسته هیدروژن به هسته هلیوم حدود ۱۰ میلیون بار بیشتر از واکنش شیمیایی است که هیدروژن با اکسیژن برای تشکیل آب انجام می دهد.[1] [7]

[1] هسته های پروتون هیدروژن-۱ با بار مثبت به دلیل بار الکتریکی یکسان، نیروی دافعه به یکدیگر اعمال میکنند.

[2] منظور همان واکنش گداخت هسته ها با یکدیگر میباشد و تنها به دلیل آشنایی خواننده با اصطلاحات در اینجا به کار گرفته شده است.

همانطور که در شکل ۲-۱-۱-۱ نشان داده شده است، در مرحله اول دو پروتون ترکیب می شوند و یکی از آنها به یک



شکل۲-۱-۱-۱- واکنش تبدیل هیدروژن به هلیوم

نوترون تبدیل می شود تا یک هسته ایزوتوپ سنگین به نام دوتریم[1] تشکیل شود. پس از آن، هسته دوتریم با یک پروتون دیگر ترکیب شده و ایزوتوپ سبک هلیم را تشکیل می دهد که به عنوان هلیوم-۳[2] شناخته می شود. در نهایت، دو هسته هلیم-۳ برای تشکیل هلیم -۴ ترکیب شده و دو پروتون آزاد می شود که با ادامه این واکنش زنجیروار تولید انرژی در خورشید بوسیله ی واکنش فیوژن انجام میشود[3](رابطه ۲-۱-۱-۲).[1][7]

رابطه ۲-۱-۱-۲:

$$D + T \rightarrow He + n$$

که در این رابطه، n تعداد نوترون و He تعداد هلیم تولیدی از واکنش میباشند.

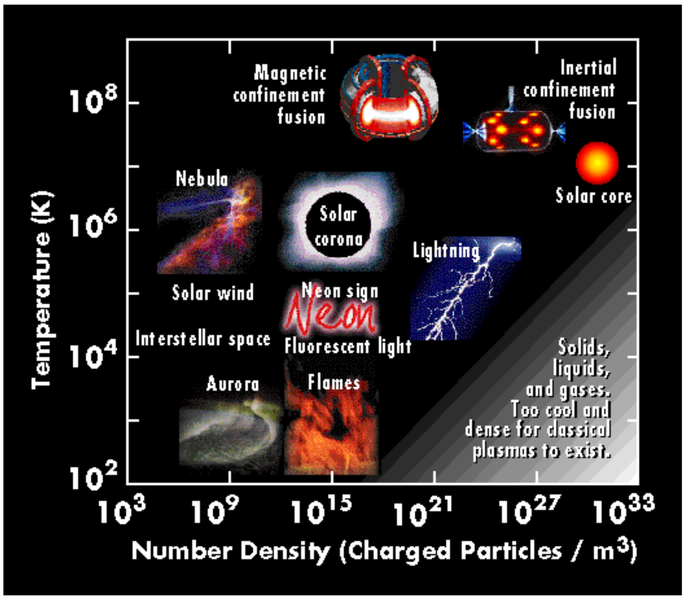
پلاسما شایع‌ترین شکل ماده مریی در جهان ، متشکل از بزرگ‌ترین سازنده ستارگان و همچنین محیط میان ستاره‌ای است. پلاسما که محیط محلی زمین را احاطه کرده‌اند در باد خورشیدی رخ می‌دهد و کمربند تشعشعی ون آلن ، مگنتوسفر و آیونوسفر را در بر می‌گیرد. تنها محیط‌های استثنایی مانند سطح یک سیاره سرد همچون زمین، می‌تواند شکل‌های دیگر ماده را کنترل کند.(شکل ۲-۱-۱-۲) حتی در زمین، پلاسما تاثیر قابل‌توجهی بر جامعه دارد. صاعقه، یک پلاسمای طبیعی که در اکوسیستم ما رخ می‌دهد، می‌تواند باعث ایجاد آتش‌سوزی‌های شدید در جنگل‌ها و خانه‌های انسان‌ها شود. پلاسمای تولید

[1] Deuterium (D)

[2] Tritium (T)

[3] البته این واکنش به تنهایی در خور شید اتفاق نمی افتد و چرخه ی کربن نیز برای وقوع آن لازم است که به دلیل ثابت بودن آن در نتیجه ی واکنش، از محاسبات حذف شده است.

شده در آزمایشگاه در تعدادی از کاربردهای صنعتی متنوع در وسایل روشنایی فلورسنت تا استریلیزاسیون در انواع خاصی از ملزومات پز شکی ا ستفاده می شود. همچنین پلا سما به بخش عمده‌ای از صنعت تولید ترا شه الکترونیکی تبدیل شده‌ا ست. انتخاب پلاسمای رانشگر موتورها برای کنترل موقعیت ماهواره‌های ارتباطی در صنعت هوافضا به کار گرفته میشود. از این رو درک و کنترل جهان به میزان زیادی با درک پدیده‌های پلاسما به ما کمک می‌کند تا به شناخت بهتری از آن برسیم و شرایط راحت و ایمنی را برای خود فراهم آوریم. [10]



شکل ۲-۱-۱-۲- رژیم‌های پلاسما : چگالی در برابر دما .

۲-۲- انواع واکنش فیوژن

انواع واکنش فیوژن بر اساس حالت رخداد آن به دو دسته ی طبیعی، که در ستارگان و آزمایشگاهی که در توکوماک ها و آزمایشگاه های تحقیقاتی انجام میشوند، تقسیم بندی میشوند.

دسته واکنش فیوژن آزمایشگاهی خود به دو نوع محصوریت مغناطیس[1] و اینرسی طبقه بندی میشود که شرایط خاصی را برای وقوع فیوژن بر روی زمین به خود اختصـــاص میدهد که موفقیت این امر، منجر به تحقیقات ســازمان ها در این زمینه شده است.

۲-۳ سوخت مصرفی و تولید الکتریسیته و توان

تولید برق در نیروگاه فســیلی از دیدگاه زیســت محیطی در نوع ســوخت و نیز روش تولید الکتریســیته از ســوخت دارای اهمیت قابل توجهی است. [11]

۲-۳-۱ نوع سوخت مصرفی

با توجه به آنچه درمورد واکنش دهنده ها در فرآیند فیوژن بیان شد، سوخت به کار گرفته شده در واکنش فیوژن توکوماک، دتریم و لیتیم میباشند و این تغییر نوع ماده شرکت کننده در واکنش از تریتیم به لیتیم، تنها بدلیل کمیاب بودن و داشتن نیم عمر پایین تریتیم در طبیعت زمین میباشد. با این حال در نتیجه واکنش لیتیم (که عنصر فراوانی بر روی زمین است) با نوترون،تولید تریتیم و نوترون اضافی برای ادامه وقوع زنجیره ای واکنش فیوژن انجام میشود که رابطه زیر این امررا نشان میدهد.

رابطه ۲-۳-۱-۱ :

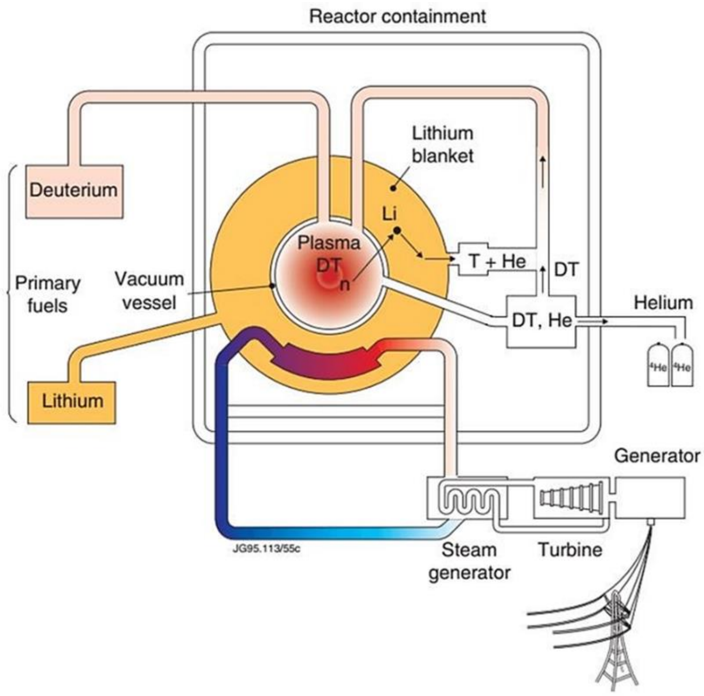
$$
\begin{aligned}
{}^{1}_{0}n + {}^{6}_{3}Li &\rightarrow {}^{3}_{1}T + {}^{4}_{2}He \\
{}^{1}_{0}n + {}^{7}_{3}Li &\rightarrow {}^{3}_{1}T + {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n
\end{aligned}
$$

۲-۳-۲ بررسی فرآیند تولید الکتریسییته

در نیروگـــاه هـــای هســـته ای از حـــرارت تولیـــد شـــده از انـــرژی هســـته ای بـــرای اســـتفاده در یـــک چرخـــه بخـــار یـــا یـــک چرخـــه گـــاز و بخـــار بـــرای تولیـــد الکتریســـیته اســـتفاده مـــی شـــود. [11] در ایـــن ســـیکل(فیوژن هســـته ای) بـــا حـــرارت دیـــدن لیتـــیم در پشـــت دیـــواره ی جـــاذب نـــوترون در اثـــر انجـــام

[1] Magnetic confinement

واکــنش فیــوژن بــین ســوخت دوتــریم و تــریتیم و تولیــد نــوترون توســط آن در قلــب توکومــاک، گــرم شــده و ایــن حــرارت بوســیله ی ســیال کمکــی و مبــدل انتقــال حــرارت، بــه ســیکل تــوربین بخــار بــرای بــه گــردش درآوردن تــوربین بخــار و تولیــد الکتریســیته توســط ژنراتــور کوپــل شــده بــه آن انجــام میگیــرد. ســوخت مصــرفی اصــلی در توکومــاک، دتــریم و لیتــیم میباشــد کــه بــدلیل کمبــود تریتیــوم بــر روی زمــین و عــدم پایدار بودن آن، این میزان از تریتیم از واکنش نوترون و لیتیم حاصل میشود.(شکل ۲-۳-۲-۱)



شکل ۲-۳-۲-۱- شماتیک عملکرد توکوماک و فرآیند تولید الکتریسیته توسط آن

خروجی قدرت خالص یک رآکتور قدرت فیوژن را می‌توان با اســتفاده از قدرت فیوژن حالت پایا یا ضــریب Q اندازه‌گیری کرد که به عنوان نســبت خروجی قدرت واکنش فیوژن به توان ورودی تعریف می‌شــود، یعنی قدرت کمکی که از خارج تامین می‌شود تا واکنش را حفظ کند (رابطه ۳-۳-۲-۱) :

$$Q = P_{output} / P_{input} = P_{fusion} / P_{aux}$$ رابطه ۳-۳-۲-۱

که در این رابطه :

P_{fusion} میزان توان تولیدی توسط واکنش فیوژن

و P_{aux} میزان توان دریافتی کمکی از بیرون میباشند.

در بررسی انجام شده برای مقایسه بین سوخت ها مطابق جدول ۲-۳-۲-۱ برای مصرف ۱۰۰۰ مگاوات انرژی الکتریسیته در یک سال، به طور چشم گیری، میزان سوخت مصرفی در واکنش فیوژن به نسبت سایر سوخت های مصرفی و همچنین شکافت هسته ای بسیار کمتر میباشد. [10]

جدول۲-۳-۲-۱- مصرف سوخت در فرآیند های متفاوت تولید انرژی

METHOD	ANNUAL FUEL CONSUMPTION FOR 1000MW,el. (typical size of a single large electric power plant)
Coal	2 700 000 tonnes
Oil	1 900 000 tonnes
Fission	28 tonnes of U
Fusion	100 kg D and 150 kg T

فصل سوم : شرایط رخداد فیوژن

۱-۳ پارامتر های وقوع و نگهداشت فیوژن

همانطور که در سایر د ستگاه ها و تجهیزات و فرآیند ها م شاهده نموده ایم ، هر یک از آنها تحت شرایط خا صی به کار مشقول هستند که این مورد در مورد فیوژن به شرح زیر میباشد .

- درجه حرارت بالا
- چگالی پلاسما
- زمان ماند کافی

محصورسازی مغناطیسی

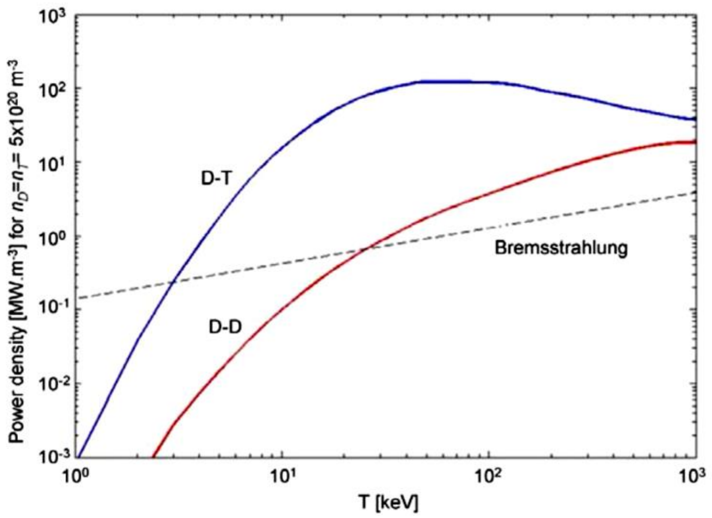
در ترکیب محصـورسـازی[1] یکی از خواص الکترومغناطیسـی ذرات پلاسـمای باردار برای به دام انداختن آن‌ها از دیواره‌ای مادی در یک پیکره میدان مغناطیسی طراحی‌شده به نام یک بطری مغناطیسی استفاده می‌شود. این امر از توانایی یک میدان مغناطی سی یکنواخت برای جلوگیری از حرکت ذرات باردار در پلا سما در طول خطوط مغناطی سی نیرو ا ستفاده می‌کند, در حالی که به آن‌ها اجازه حرکت آزادانه در امتداد آن‌ها را می‌دهد. تحقیق و توسـعه در زمینه ترکیب محصـورسـازی, مفاهیم پیکربندی محصورسازی را مطرح کرده‌است .[2]

لاو سان حداقل درجه‌حرارت مورد نیاز برای یک رآکتور همجو شی را ارایه داده ا ست که دمای آ ستانه که در آن چگالی توان فیوژن، تنها از تابش برمستراالانگ[2]تجاوز می‌کند. بنابراین، از شکل ۳-۱-۱ مشاهده میشود که حداقل درجه‌حرارت برای انجام واکنش های D - T ، برابر با 3 keV , و برای واکنش های D - D، در جه حرارت برابر با ۲۰ keV اســـت .[2]

(~10 keV~100 million °C)

[1] confinement

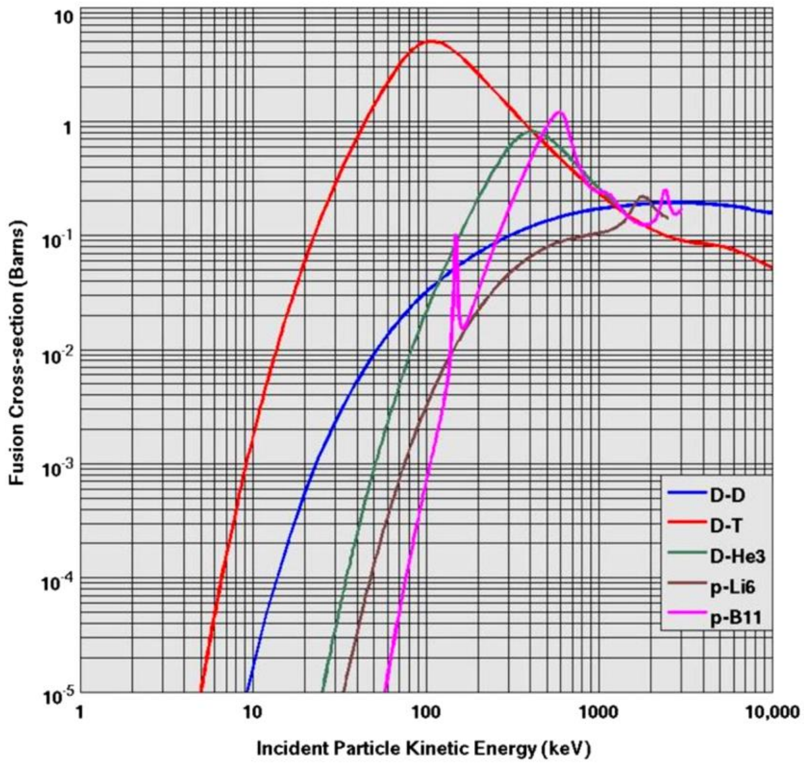
[2] Bremsstrahlung،تابش الکترومغناطیسی ناشی از شتاب یا به خصوص کاهش سرعت یک ذره باردار پس از عبور یک هسته از میدان های الکتریکی و مغناطیسی .



شکل-۳-۱-۱-میزان چگالی توان بین واکنش سوخت ها بر حسب درجه حرارت اعمالی

همانطور که هسته دوتریم و هسته تریتیم، کم‌ترین انرژی اتصال را در هر ذره نوکلئون دارند، انرژی جنبشی که برای آن‌ها لازم است تا بیش‌ترین احتمال فیوژن را داشته باشند، پایین‌ترین است. لذا این امر با منحنی‌های شکل ۳-۱-۲ بیان شده، که برای واکنش D - T و همچنین برخی از واکنش‌های فیوژن دیگر رسم شده‌است. در این شکل، بر روی محور افقی انرژی جنبشی ذرات واکنش از چپ به راست افزایش می‌یابد در حالی که محور عمودی (بر حسب بارن[1]) احتمال برخورد بین دو ذرات با همان انرژی جنبشی که منجر به واکنش فیوژن می‌شود را نشان می‌دهد . بنابراین واکنش D - T دارای بیش‌ترین سطح و میزان انرژی در حدود ۱۰۰ keV است(کمترین میزان انرژی به نسبت سایر واکنش ها) ، در حالی که برای واکنش‌های دیگر ، احتمال پیک در دمای بسیار بالاتر رخ می‌دهد، احتمال آن‌ها بسیار کمتر هستند.[2]

[1] Barns ، یک واحد مساحت، ۱۰ تا ۲۸ مترمربع

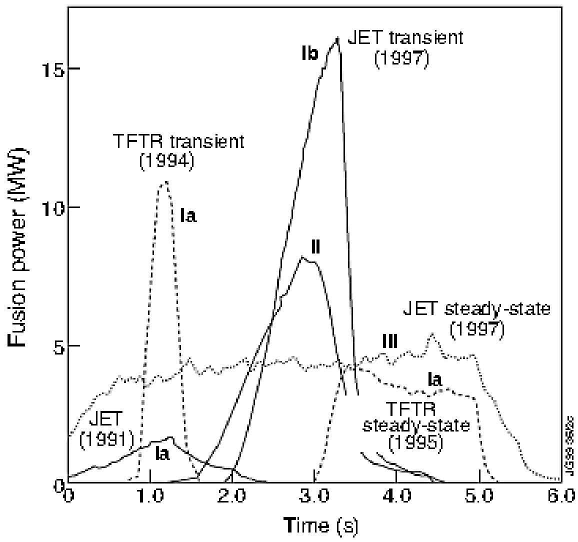


شکل ۳-۱-۲- فیوژن برای واکنش‌های برخوردی مختلف به عنوان تابعی از انرژی جنبشی یک رویداد. منحنی داده ها برای D - D ،D - T ،D - He ۳ و P-۶ Li .

فصل چهارم : توکوماک راکتور

۴-۱ زمینه تحقیقات

پیشرفت مداوم در طول چندین دهه، محققان را به نشان دادن امکان‌پذیری فیزیک پلاسما از طریق مفاهیم محصور شدن و اینرسی معطوف کرده‌است. تجهیزات واکنش اصلی فیوژن به تازگی تکمیل شده‌اند (به عنوان مثال ، تاسیسات اشتعال ملی) یا در حال ساخت میباشند (به عنوان مثال ، ایتر[1]) که به منظور بررسی مسایل مهم فیزیک پلاسما نزدیک به شرایط عملیاتی رآکتور طراحی شده‌اند. در صورت موفقیت آمیز بودن این تحقیقات، توجه به تسهیلات فیوژن گام بعدی در مقیاس بزرگ خواهد بود که موانع بزرگ تکنولوژیکی را برای انرژی فیوژن عملی، مورد بررسی قرار خواهد داد. در شکل ۴-۱-۱ میزان پیشرفت تحقیقات آزمایشگاهی فیوژن در فازهای مختلف از پروژه های جت[2]و توکوماک آزمایشی فیوژن[3]را نشان داده شده است.[10]



شکل۴-۱-1- توسعه توان فیوژن در واکنش های D - T (خطوط نقطه‌چین)

و TFTR (خطوط خط چین) , در رژیم‌های مختلف

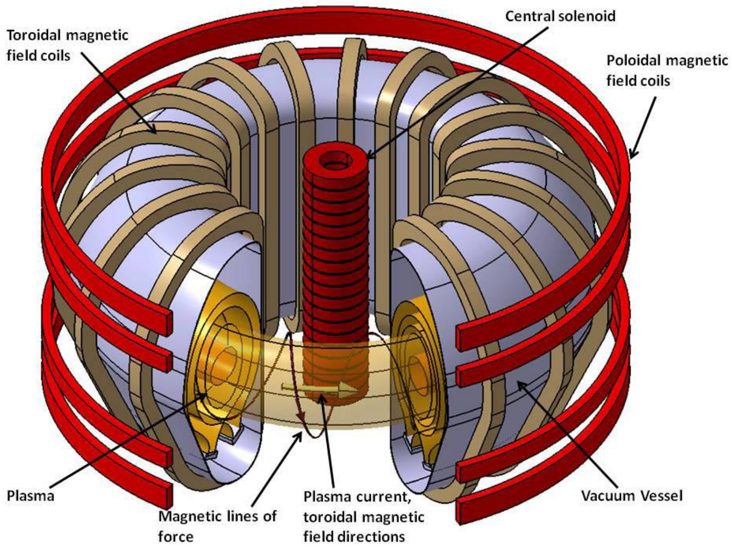
---

[1] ITER

[2] Joint European Torus

[3] Tokomak Fusion Test Reactor

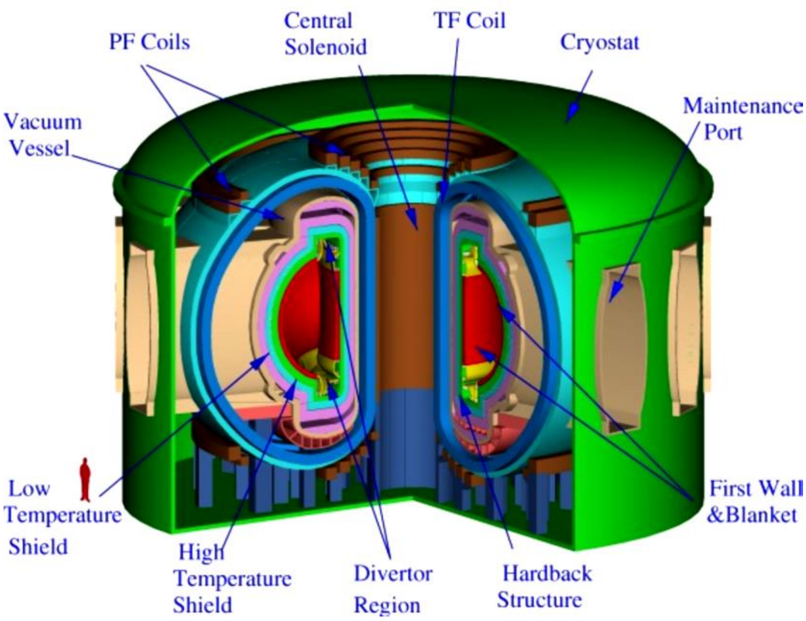
همانطور که در شکل ۴-۱-۲ مشهود است، ترکیب میدان های مغناطیسی و پولوئیدی به مفهومی تحت عنوان بطری‌های مغناطیســـی میرســـند[1]که در آن‌ها می توان پلاســـمای داغ را دور از دیواره‌ی مادی به حالت پایدار برای مدت‌های طولانی محصور کرد. در این سطوح مغناطیسی, پلاسمای داغ در هسته از پلاسمای سرد در نزدیکی لبه عایق می شود. ذرات باردار می‌توانند از طریق برخورد با ذرات باردار دیگر یا از طریق توربولانس, از سطح مغناطیسی عبور کنند. با این حال, آن‌ها معمولاً میلیون ها برابر طول محفظه را قبل از رسیدن به دیواره‌ی مادی پوشانده و از بین می‌روند. بررسی‌هایی از ساختارهای کامل در توکوماک و سایر مغناطیس ها در مقالات منتشر شده‌است که در خصوص کسب اطلاعات بیشتر میتوان به آنها مراجعه نمود.[2]



شکل ۴-۱-۲- شماتیک توکوماک راکتور به همراه میدان های مغناطیسی

[1] Tokamak، یک دستگاه تورس مانند برای تولید واکنش های فیوژن کنترل شده در پلاسمای گرم.

در شکل ۴-۱-۳ یک طرح کلی از نیروگاه توان ARIES - RS که ۱۰۰۰ مگاوات برق تولید می‌کند، نشان‌داده شده‌است . پلا سمای ARIES - RS برای ر سیدن به ف شار پلا سما بالا و ک سر جریان بوت ا سترپ بالا (۹۰ ٪) بهینه شدها ست که با پروفیل چگالی جریان مورد نیاز همخوانی دارد. تحلیل هدایت جریان ن شان داد که حدود ۸۰ مگاوات برق محرک جریان برای عملیات پایدار ضـــروری اســـت. این طراحی از یک پتوی لیتیوم با یک ســـاختار وانادیوم دار اســـتفاده می‌کند که بازده تبدیل حرارتی بالا ۴۶ ٪ (با ا ستفاده از دمای خروجی آب‌خنک و یک سیکل بخار رانکین) به د ست می آید. ا ستفاده از وانادیوم در مناطق دمای بالا به اندازه کافی سطح پایینی از بخار خروجی را فراهم می‌کند که حوادث خنک‌کننده بدترین حالت را می‌توان در نتیجه یک انتشار کوچک نشان داد. [6]



شکل ۴-۱-۳- شماتیک توکوماک ARIES - RS

همچنین، واکنش‌های همجوشـــی در پلاســـما با دمای بالا یونیزه می‌شـــود که بوســـیله مغناطیس قوی توروئیدال و میدان مغناطیسی پولوئیدی شکل می‌گیرد . نوترون‌های پر انرژی و حرارت تولید شده توسط واکنش ترکیب دتریم - تریتیم (D - T) توســـط اولین دیوار ، پتو ، و اجزای دایورتر احاطه می‌شـــوند . واکنش همجوشـــی در درون یک محفظه خلا رخ می‌دهد تا از آلودگی اتم سفر پلا سمای دتریم - تریتیم جلوگیری شود. توابع ا صلی این منطقه برای به کار گیری موثر انرژی تولید شده توسط واکنش‌های فیوژن و انتقال حرارت به خنک‌کننده برای تولید برق و ساخت و استخراج سوخت تریتیم تازه (با استفاده از واکنش‌های هسته‌ای با مواد لیتیم مایع یا مواد جامد) برای فعال کردن عملیات مداوم سیستم انرژی همجوشی است .[4]

انواع گسترده‌ای از مواد ساختاری، سیال خنک‌کننده رآکتور و سیستم‌های مواد تولید تریتیوم برای استفاده احتمالی در راکتورهای گداخت آینده ارزیابی شده‌اند. جدول ۴-۱ ترکیبات مواد و متریالی را نشان می‌دهد که از نظر بازده ترمودینامیکی، تولید نوترون، سازگاری شیمیایی و سایر ملاحظات مهندسی، بسیار امیدوارکننده هستند. مواد ساختاری با کارایی بالا برای موفقیت آینده رآکتورهای انرژی ترکیبی پیشـــنهادی، حیاتی خواهند بود که این ســـاختارها را با تنش‌های حرارتی شـــدید و خنک کننده های حرارتی متفاوت که ممکن است باعث ایجاد خوردگی شوند، مورد بحث و بررسی قرار خواهند داد. تغییرات حرارتی در حالت پایا برای اولین دیواره و دایورتر در راکتورهای انرژی فیوژن به صورت مغناطیسی محصور شده، در محدوده ۱ تا ۱۰ مگاوات / ۲m است، که به طور قابل‌توجهی بالاتر از شار حرارتی برای مواد ساختاری در راکتورهای شکافت میباشد (۱ مگا واتی / ۲m برای روکش فلزی است) [4]

جدول ۴-۱- خلاصه مواد ساختاری پیشنهادی ، خنک‌کننده و مفاهیم تولید تریتیم برای سیستم های انرژی فیوژن . سلول‌های پر شده در جدول ، ترکیبات مادی را نشان می‌دهند که در مورد پتوی انرژی فیوژن در نظر گرفته می‌شوند.

Structural Material	Coolant/Tritium Generating Material System					
	Li/Li	He/PbLi	H_2O/ PbLi	He/Li ceramic	H_2O/Li ceramic	FLiBe/ FLiBe
Ferritic steel						
V alloy						
SiC/SiC						

فصل پنجم : بررسی سناریو ها

۵-۱ سازمان های مربوطه

ســـازمان هایی همچون روس اتم[1] یوروفیوژن[2]،ســـازمان جهانی انرژی اتمی[3]،فیوژن برای انرژی[4] و ایتر[5] را که در زمینه ی تحقیقات و مدیریت فیوژن به کار مشغول هستند را میتوان نام برد.

اداره علوم انرژی فیوژن[6] در بخش علوم وابســـته به انرژی و در هم‌کاری با بنیاد علمی ملی , تلاش برای تحقیقات پایه در علوم پلاســـما را هدایت می‌کند . این برنامه اداره علوم انرژی فیوژن اســاســاً بر روی مفاهیم پایه‌ای انرژی مغناطیســـی فیوژن متمرکز شده‌است .[6]

۵-۲ وضعیت فیوژن

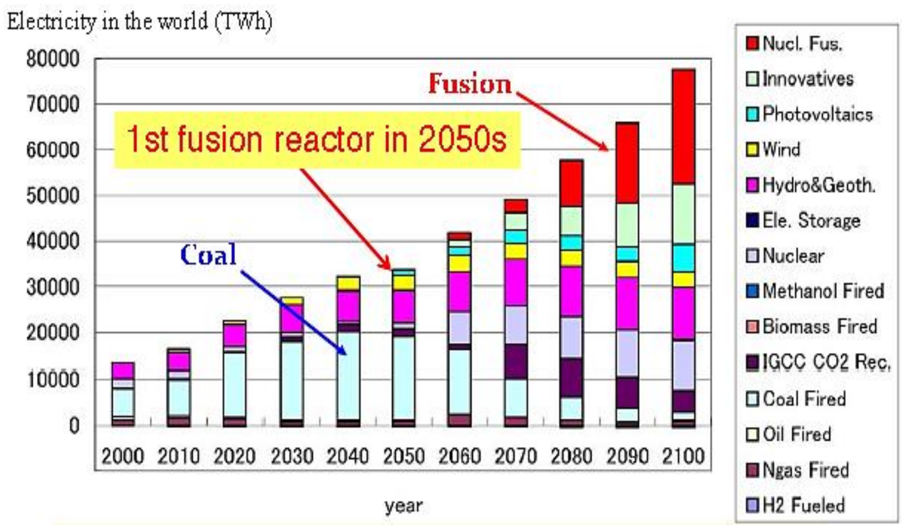
تلاش برای همجو شی هـ سته‌ای با نیاز به تولید الکتریـ سیته با کربن پایین به میزان زیاد و قابل‌پیش‌بینی , در محیطی که تقاضای جهانی الکتریسیته افزایش زیادی دارد , سوق داده می‌شود . انتظار می‌رود که این تقاضا شاید در بخش دوم این قرن رفع شود , تا زمانی که اکثریت قریب به اتفاق منابع انرژی بسیار کم باشد . برای اینکه یک سهم مرتبط در سطح جهانی ایجاد کنیم , تخمین زده می‌شـــود که فیوژن باید در دوره بلند مدت حداقل ۱ / تراوات برق تولید کند . امروزه , اروپا یک رهبر در تحقیق و توسعه فیوژن است و می‌تواند به عنوان یک بازیگر کلیدی در بازار همجوشی باشد . برآوردن این نیاز طولانی‌مدت در زمان، نیازمند یک برنامه قوی به موازات ساخت و بهره‌برداری از ایتر است . [8]

---

[1] Rosatom
[2] Eurofusion
[3] IAEA
[4] F4E
[5] ITER
[6] OFES

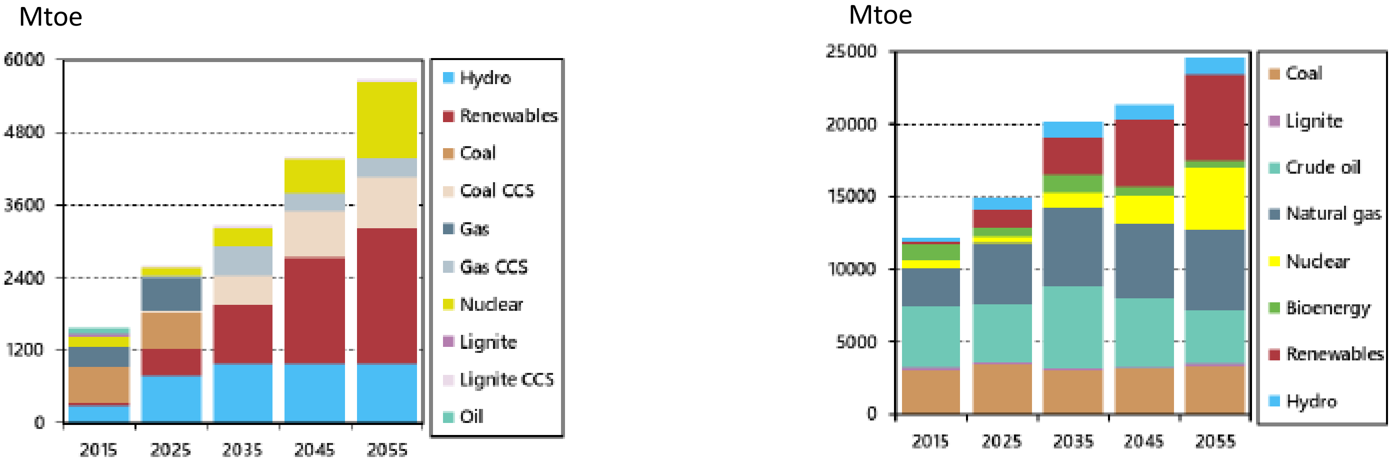
۵-۳ آینده نگری فیوژن

در بررسی های انجام شده در کنفرانس بین المللی انرژی اتمی، پیش بینی و برنامه ریزی شد تا با همکاری کشورها در پروژه TFTR ،زمینه های دستیابی به اولین نیروگاه برق تجاری با فرآیند فیوژن در سال ۲۰۵۰ فراهم آید.همانطور که شکل-1-3-5 نشان میدهد، پیش بینی شد هر ۱۰ سال بر مبنای این سناریو بر میزان استفاده از فیوژن افزوده شود.



شکل ۵-۳-۱- سهم هر منبع انرژی از تولید الکتریسیته تا سال ۲۰۵۰

نتایج مشابهی در بررسی سناریوهای پیشبینی تامین انرژی در طی سال های آینده به طریق افزایش استفاده از سوخت هسته ای در کنار سایر منابع انرژی موجود در سبد انرژی انجام شده است که با در نظر گرفتن مسائل محیط زیستی، اقتصادی، سیاسی، ژئوپولتیکی و تحریم کشورها ، آیندهنگری جهتگیری کشورها و سازمان های آنها را به سمت تامین انرژی بیشتر با تکیه بر انرژی هسته ای و بهبود تکنولوژی آنرا در نظر میگیرد که در شکل ۵-۳-۲- نمونه ای از آن مشاهده میشود.[10]



شکل ۵-۳-۲- بررسی سناریو مصرف انرژی تا سال ۲۰۵۵ بر مبنای انرژی هسته ای

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به میزان سوخت مصرفی، چگالی انرژی تولیدی حداکثر به نسبت سایر منابع انرژی، فراوانی دسترسی به سوخت مصرفی فرآیند و قابلیت احداث در هر جغرافیای مکانی با تحقق امنیت انرژی برای کشور ها در دوره های بحران انرژی جهانی و مشکلات سیاسی بین کشور ها بعلاوه کسب اطمینان عموم مردم از جهت حفاظتی همانند فاجعه های جزایر تری مایل ، فوکوشیما ژاپن و چرنوبیل و اثرات رادیواکتیو با در نظر گرفتن توافق های کیوتو ، پاریس و پیمان های سال های آتی از جهت کنترل انتشارات گازهای گلخانه ای توسط کشور ها، با ادامه تحقیقات بر توکوماک های تحقیقاتی و انجام پژوهش ها در این زمینه، تامین انرژی پایه توسط فیوژن به عنوان اصلی ترین منبع کسب انرژی در سبد انرژی کشور ها و جوامع مصرف کننده آینده قرار خواهد گرفت. از این رو سیاست گزاران در مجامع بین المللی تغییراتی در روند معمول تصمیم گیریهایشان در قبال انرژی خواهند داشت که این تصمیمات بر کشور های تولیدکننده و مصرف کننده انرژی اثرات قابل توجهی را در سال های آینده به دنبال دارد. لذا انجام پژوهش ها و همکاری با سازمان ها و موسسات تحقیقاتی درگیر با موضوع، امکان حصول در زمینه دانش استفاده از آن و به کارگیری آن را فراهم میآورد و توجه به این موضوع با دیدی سطحی و گذرا نادرست، و اثرات جبران ناپذیری را در سال های آینده و مواجهه با مسائل انرژی و میزان آن با گذشت زمان پدیدار خواهد گشت.

همچنین پیشنهاد میشود تحقیقات در زمینه های زیر انجام شود:

- بررسی روش های اگزلری گرمایش پلاسما در توکوماک.
- بررسی استفاده از سوخت های بارون و ....(غیر از دوتریم-تریتیم) در تامین انرژی فیوژن و نوع و شرایط دستگاه های عملیاتی آنها.
- بررسی استلریتر و محصوریت پلاسما.
- بررسی پروژه در حال احداث ITER و نقاط قوت آن به نسبت توکوماک.
- بررسی فیوژن در ایران و شرایط فعلی دستگاه های توکوماک دماوند(وارداتی از روسیه) و روند تحقیقات در این زمینه.
- بررسی اثرات امنیت هسته ای از جهات متفاوت .

مراجع

[1] agancy, International atomic. n.d. http://www.iaea.org.

[2] Agancy, International Atomic Energy. *Fusion physics.* iaea, 2011.

[3] agancy, International energy. *WORLD ENERGY BALANCES.* 2018.

[4] Busby, Steven J. Zinkle and Jeremy T. *Structural materials for fission & fusion energy.* 2008.

[5] Dawud Ansari a, b, Franziska Holz a, Hasan Basri Tosun. *Global Futures of Energy, Climate, and Policy: Qualitative and Quantitative Foresight Towards 2055.* 2018.

[6] Energy, the Fusion Energy Sciences Advisory Committee for the Office of Science of the U.S. Department of. *OPPORTUNITIES IN THE FUSION ENERGY SCIENCES PROGRAM.* 1999.

[7] Eurofusion. n.d. http:www.euro-fusion.org.

[8] —. *European Research Roadmap to the Realisation LONG VERSION of Fusion Energy.* 2018.

[9] Kvemdokk, Michael Hoel a Snorre. *Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming.* 1996.

[10] Oost, J. Ongena & G. Van. *Energy for Future Centuries: Prospects for Fusion Power as a Future Energy Source.* 2012.

[11] بیرانوند, معصومه شجاعی، ساناز غازی و مهتاب. *انجام مطالعات اقتصادی و زیست محیطی نیروگاه های فسیلی و هسته ای و ارائه گزینه بهینه.* ۱۳۹۱.